DOI: 10.11858/gywlxb.20240729

动能侵彻弹装药起爆可靠性试验及敏感因素分析

杨 慧[1], 王可慧[1], 王伟光[1], 李 洋[2], 沈子楷[1], 段 建[1], 戴湘晖[1]

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;
2. 火箭军装备部装备项目管理中心, 北京 100085)

摘要: 为研究弹体结构设计对弹体装药起爆可靠性的影响, 设计了一种低成本、便捷式引战静态匹配试验装置, 开展了不同条件下引信与装药的传爆裕度试验。基于移动最小二乘法, 构建了可表征起爆可靠性的多变量响应函数, 定量分析了各敏感因素及其耦合作用对起爆可靠性的影响规律。结果表明: 传爆间隙和缓冲层厚度对弹体装药起爆影响较大, 而隔板厚度在预设 3～5 mm 范围内的影响较小; 为保证动能侵彻弹在使用环境温度范围内可靠作用, 引信相对偏离位置、隔板厚度、传爆间隙以及缓冲层厚度分别不应超过 25、3.5、25 以及 22 mm。该试验装置、分析方法及研究成果可为动能侵彻弹结构设计及可靠性验证提供借鉴和指导。

关键词: 动能侵彻弹; 引战匹配; 传爆裕度; 传爆间隙; 惰性缓冲层; 移动最小二乘法

中图分类号: O389; TQ560.1 **文献标志码:** A

动能侵彻弹是目前应用较为广泛的武器类型之一, 其利用飞行动能撞击并侵入坚固目标后引爆内部高能炸药, 可实现对坚硬目标的高效毁伤。在该领域, 以美国为代表的各军事强国经过多年研究, 已取得不少成果, 并在战争中发挥了重要作用, 其中, 高强度壳体结构设计、高能钝感装药研制以及智能侵彻引信研发等关键技术仍是当前研究的热点[1−3]。

近年来, HMX、TATB 和 CL-20 基高能钝感炸药的成功研制及相关工艺技术的完善[4−8], 对高速侵彻武器装备的发展起着巨大的推动作用。侵彻过程中的高过载环境(10^5g 量级)[9] 对引信提出了严苛要求[10−11]: 一方面, 在追求小型化的前提下, 引信应利用有限空间输出足够的能量, 确保可靠引爆钝感装药; 另一方面, 整个爆炸序列的不敏感程度应与主装药匹配, 抗冲击过载性能高, 以确保试验安全。因此, 在新型侵彻弹的研制中[12], 科研人员通常会进行引战匹配性试验[13] 以评估起爆可靠性, 主要包括引战静态匹配性试验(结合弹体静爆威力试验)和引战动态匹配性能试验(利用火箭橇发射平台)。在侵彻弹研制初期, 综合考虑研制周期、安全性等因素, 往往以引战静态匹配性试验作为评估标准。

目前, 针对装药起爆问题已经进行了诸多研究。陈鹏等[14] 利用轻气炮和高速摄影装置研究了 PBX 炸药在完全约束条件下的点火性能, 并采用 LS-DYNA 软件对上述过程进行了数值模拟。崔银锋等[15] 设计了一种适用于聚能战斗部的直列式引信用传爆序列, 并利用引战静态匹配性试验对传爆序列起爆、传爆以及隔爆能量匹配性问题进行了初步研究。肖向东等[16] 利用 LS-DYNA 软件研究了冲击波作用下引信传爆序列中爆轰波的传播规律。姚奎光等[17] 设计了一种机械约束装药点火实验装置, 分析了不同约束下 2 种 HMX 基压装 PBX 炸药装药的反应演化行为。白志玲等[18] 建立了熔铸炸药点火调控模型, 研究了炸药本征燃烧速率、壳体约束强度等因素对装药反应演化过程的影响规律。楼建锋等[19] 对长管强约束条件下 HMX 基 PBX 炸药点火实验开展了数值模拟研究, 分析了不同点火方式对炸药反应演化规律的影响。此外, 张世林等[20] 和梁争峰等[21] 利用试验法及有限元法研究了引信传爆序列的可靠性以及引信与主装药的起爆可靠性。遗憾的是, 由于弹体结构中多种相关材料的动态本构关系难

* **收稿日期:** 2024-02-26; **修回日期:** 2024-03-15
作者简介: 杨 慧(1989—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: yanghui@nint.ac.cn
通信作者: 王可慧(1975—), 女, 博士, 研究员, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: wangkehui@nint.ac.cn

以准确表征并且受到某些随机因素的影响，利用传统的显式动力学相关计算方法求解上述问题时，不仅数值求解难度很大，而且获得的计算结果很难与多种工况的试验结果保持一致[16, 20]。

另一方面，在实践过程中，科研人员根据发射平台、侵彻目标特性等因素的不同，设计了不同的装药结构及缓冲结构，如表面涂覆复合高分子惰性涂层、装药尾部加惰性缓冲层等[22−23]，从改善力学环境的角度提高主装药的安定性；同时，弹体装配的间隙、偏差和侵彻目标靶的装药压缩量会造成装药与引信之间产生较大的间隙；此外，引信装配在弹体后盖的位置、隔板厚度以及环境温度等因素都会影响引信与装药的匹配性能[24−25]。然而，目前关于弹体装药与引信的起爆、传爆可靠性研究主要集中在引信传爆序列的可靠性以及引信与主装药的起爆可靠性研究，忽略了动能侵彻弹结构设计的影响[10, 15−16, 20−21]。因此，目前传统的分析方法（引战静态匹配性试验结合数值模拟方法）难以准确、系统地分析弹体结构设计对装药起爆可靠性的影响规律，特别是结构设计中各尺寸因素以及各因素之间的耦合作用对装药起爆可靠性的影响规律。

为解决上述问题，本研究从动能侵彻弹结构设计出发，依据传爆序列工作原理，设计一种低成本、便捷式的引战静态匹配试验装置，通过开展引信与主装药的传爆裕度试验，系统研究传爆间隙、惰性缓冲层厚度、试验环境温度、引信相对位置和隔板厚度等因素对侵彻弹起爆传爆可靠性的影响；在此基础上，基于移动最小二乘法，构建多变量响应函数的高精度模型，分析结构设计中各尺寸因素以及各因素之间的耦合作用对起爆可靠性的影响规律，并评估引信与弹体装药可靠起爆的适用条件范围，以期为动能侵彻弹的设计和起爆可靠性研究提供理论指导。

1　弹体结构与传爆序列

动能侵彻弹在侵彻过程中会经历复杂的高过载力学环境，因此，需要进行特殊的抗高过载装药结构设计[22]，以确保战斗部装药安定性。动能侵彻弹结构设计如图 1 所示，其主要由壳体、主装药、惰性缓冲层、后盖及引信等组成。

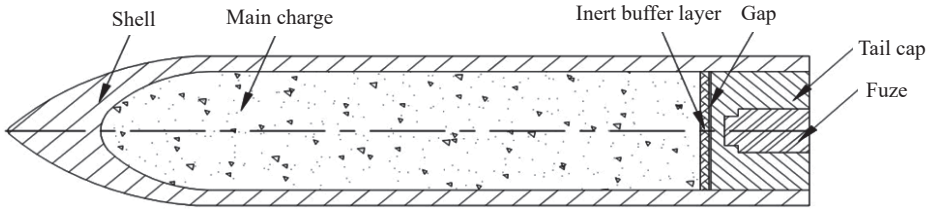


图 1　动能侵彻弹结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the kinetic energy penetrator

动能侵彻弹的起爆传爆序列通常由雷管、导爆药、传爆药以及主装药等组成。首发火工品（雷管）在接收发火能量（即引信接收到目标的起始信号或能量）后输出爆轰，导爆药和传爆药接收上一级火工品输出的爆轰能量并逐级放大输出爆轰波，进而引爆弹体的主装药[15, 26]，其原理如图 2 所示。

传爆序列作用过程如图 3 所示。利用该设计，可将很小的初始能量可控地放大到适当的爆轰冲量以引爆弹体装药，实现武器的毁伤作用。

根据 GJB 376—1987《火工品可靠性评估方法》，传爆序列爆轰传递的可靠度由每个界面的爆轰传递可靠度和每个药柱的内爆轰传递可靠度组成，起爆、传爆能量匹配性设计是传爆序列设计的核心问题之一。动能侵彻弹的可靠性设计不仅需考虑引信、主装药内部的传爆可靠性问题，还需重点关注引信与装药的能量匹配性，科学合理地指导弹体结构优化设计，以确保武器系统高安全性、高可靠性的起爆要求。

针对引信与装药的能量匹配性问题，不仅需要分析引信起爆主装药的作用过程，即引信起爆后，传爆药输出的爆轰能量击穿底部引信壳体和后盖盲孔，通过空气间隙和惰性缓冲层，将爆轰能量作用在主装药表面，进而起爆主装药，还需要考虑动能侵彻弹结构中引信的冗余设计，利用多个子引信并联的方式进行起爆，以提高武器系统作用可靠性。

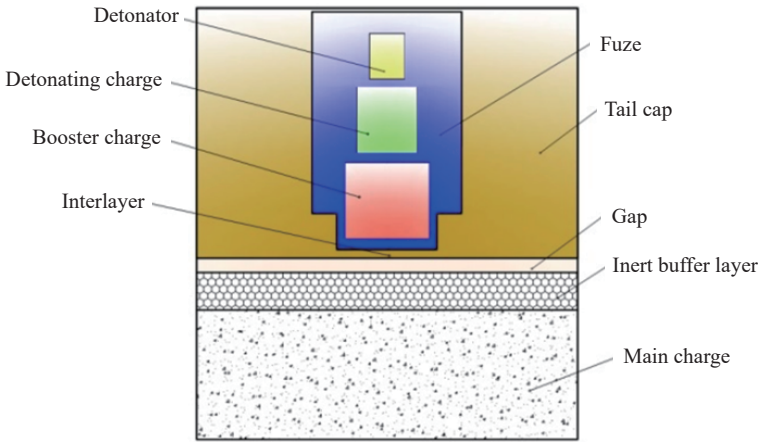


图 2　侵彻弹传爆序列模型示意图

Fig. 2　Schematic diagram of detonation transmission model

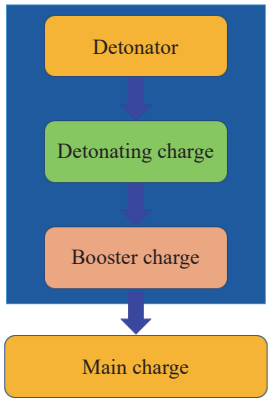


图 3　传爆序列作用原理示意图

Fig. 3　Schematic diagram of detonation transmission

2　试验设计

根据动能侵彻弹的结构特点，结合相关研究[15, 20, 27–28]，引信与装药能量匹配性研究需考虑引信装配间隙和侵彻过程中装药压缩量造成的空气间隙、弹体装药尾端缓冲设计的惰性层厚度、弹体工作的环境温度、引信壳体和后盖盲孔造成的隔板厚度以及引信孔设计的相对位置等因素的影响。

2.1　试验装置设计

针对引战静态匹配性试验要求，设计了一种低成本、便捷式引战静态匹配试验装置。试验装置主要由引信、隔板、支架、主装药柱和见证钢板等组成，结构如图 4 所示。

为真实模拟战斗部的引信与装药作用过程，采用试验状态引信（不含起爆控制模块），通过起爆线连接起爆器进行远程引爆；隔板用于模拟引信壳体和后盖盲孔结构，采用与弹体后盖相同的材料；隔板与装药之间的间隙用于模拟装配间隙和侵彻过程中装药压缩量造成的空气间隙等；装药结构设计与弹体尾部装药结构一致（含惰性缓冲层和主装药），外侧用 45 钢桶或硬纸壳进行包覆；见证钢板采用 Q235 钢材料，厚度为 8～10 mm，尺寸为弹体直径的 3～5 倍。试验时，引信的爆轰能量通过隔板和空气间隙传递至主装药，进而引爆战斗部。若见证钢板上形成的炸孔不小于主装药直径，则表明该发试验参数设置合理，可实现稳定爆轰，引信与战斗部装药能量的匹配性能良好；若炸孔直径小于主装药直径，甚至见证钢板未形成炸孔，则表明该试验参数设置不合理，无法正常起爆战斗部装药。

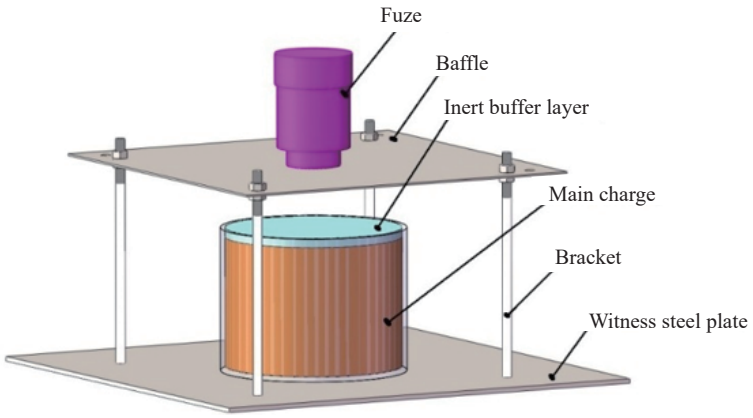


图 4　便捷式引战静态匹配试验装置示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the portable static test device for fuze-warhead coordination

2.2　试验方案

按照 GJB 150.3A—2009 和 GJB 150.4A—2009《军用装备实验室环境试验方法》中环境试验温度条件的要求，环境温度上限为 60 ℃，下限为–45 ℃；为有效降低发射过程中高过载环境对主装药的冲击作用，根据弹体设计（见图 1）的相关经验，本研究中惰性缓冲层厚度范围设置为 15～30 mm；为准确评估传爆间隙对弹体装药起爆的影响，根据 GJB 1307A—2004《航天火工装置通用规范》中的相关规定，隔板与装药的间距变化范围选取为 0～40 mm；考虑到引信冗余设计的工况（子引信外侧面相切且并排安装）以及试验中引信的直径为 60 mm，引信的上、下限偏移位置分别为偏心 30 mm 和偏心 0 mm（中心起爆）；根据弹体设计的相关经验，隔板厚度上、下限分别设置为 5 和 3 mm。

在此基础上，设计不同条件下引信与装药的起爆传爆可靠性试验方案，通过分析起爆后药块残留、见证钢板炸孔直径及炸坑情况判断侵彻弹的传爆可靠性。具体试验方案为：

(1) 分别研究不同环境温度（高温 60 ℃、常温 22 ℃、低温–45 ℃）对弹体装药起爆的影响；

(2) 设计不同厚度（15、20、25 和 30 mm）的惰性缓冲层，研究惰性缓冲层厚度对弹体装药起爆的影响；

(3) 通过支架螺母改变隔板与装药的间距（0、20、25、30 和 40 mm），研究传爆间隙对弹体装药起爆的影响；

(4) 综合研究引信位置、隔板厚度 2 个因素对引战静态匹配效果的影响，其中，引信位置分为中心起爆和偏心 30 mm 起爆，隔板厚度分别为 3 和 5 mm。

3　结果与讨论

3.1　试验结果

为更好地研究引信相对位置、隔板厚度、传爆间隙、惰性缓冲层厚度以及环境温度等因素对弹体起爆可靠性的影响，引信与侵彻弹简易结构的传爆裕度研究共进行 4 轮次 22 发试验，试验结果如表 1 所示。

引信可靠起爆主装药的照片如图 5 所示。通过观察发现，试验后无任何残留物，支架和间隔板等均被炸飞，药柱下方炸出一个较大的深孔，深挖炸孔底部或附近发现见证板切片。

图 6 给出了引信正常作用但主装药解体的照片。试验参数和结果见表 1 中Ⅰ-4、Ⅰ-5 和Ⅰ-6。试验现象的共同点为隔板上均形成炸孔，说明引信已正常作用；支架整体结构发生变形或断裂，炸药碎裂成药块四处散落，见证板未见明显变形。分析炸药碎裂的原因：一方面是爆轰能量裕度不够，导致炸药仅被爆轰波击碎但未能发生爆炸；另一方面在于 3 发试验中主装药的外壳均为硬纸壳包装，炸药碎块碎裂后周边没有强约束，导致药块向四周飞散。

图 7 对应表 1 中Ⅲ-2、Ⅲ-3、Ⅲ-5 和Ⅲ-6 的试验结果，其中药柱外侧为 45 钢壳体。通过观察发现，引信均正常作用，除Ⅲ-5 试验的装药未发生反应，仅上表面发生破碎外，其他试验现场均发生了剧烈燃烧，隔板出现严重卷曲变形，见证钢板未发生变形破坏。

表 1　不同条件下传爆裕度试验的测试结果

Table 1　Test results of the detonation transfer margin under different conditions

Case	Relative position of fuze/mm	Thickness of interlayer/mm	Distance of gap/mm	Thickness of inert buffer layer/mm	Temperature/℃	Result
Ⅰ-1	0	3	20	20	–45	Detonation
Ⅰ-2	0	3	20	20	22	Detonation
Ⅰ-3	0	3	30	20	60	Detonation
Ⅰ-4	0	3	40	20	–45	Unexploded
Ⅰ-5	0	3	30	20	–45	Unexploded
Ⅰ-6	0	3	30	20	22	Unexploded
Ⅰ-7	0	3	25	20	22	Detonation
Ⅰ-8	0	3	25	20	–45	Detonation
Ⅱ-1	30	3	30	15	22	Detonation
Ⅱ-2	30	3	40	15	22	Detonation
Ⅱ-3	30	3	30	15	–45	Detonation
Ⅱ-4	30	3	40	15	–45	Detonation
Ⅱ-5	30	3	30	15	60	Detonation
Ⅲ-1	30	5	20	20	60	Detonation
Ⅲ-2	30	5	20	25	60	Unexploded
Ⅲ-3	0	5	5	30	60	Unexploded
Ⅲ-4	30	5	30	15	60	Detonation
Ⅲ-5	0	5	0	30	–45	Unexploded
Ⅲ-6	30	5	20	20	–45	Unexploded
Ⅲ-7	30	5	20	15	–45	Detonation
Ⅳ-1	30	5	20	15	22	Detonation
Ⅳ-2	30	5	20	20	22	Detonation



(a) State before test　　(b) Crater after test　　(c) Witness steel plate after test

图 5　引信与等效弹体传爆可靠性试验的典型照片

Fig. 5　Typical photos of tests for detonation reliability between the fuze and equivalent penetrator

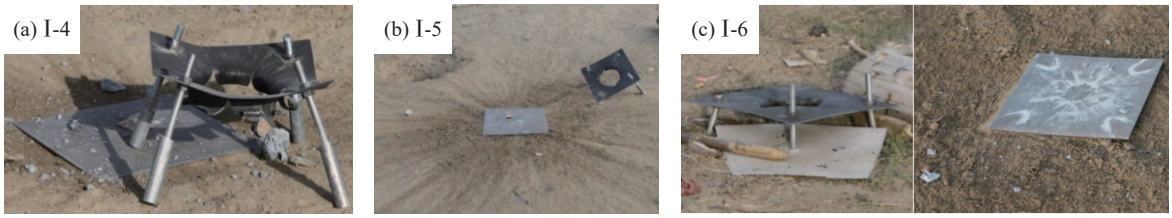


图 6　硬纸壳药柱未正常起爆的试验结果照片

Fig. 6　Photos of undetonated results of main charge with hard paper shells



图 7　钢外壳药柱未正常起爆的试验结果照片

Fig. 7　Photos of undetonated results of main charge with steel shells

3.2　敏感因素的影响分析

综合以上试验结果及现象，基于控制变量法对引战匹配试验中敏感因素的影响规律进行分析。

3.2.1　传爆间隙

对比低温环境试验（工况 Ⅰ-1、Ⅰ-4、Ⅰ-5）和常温试验（工况 Ⅰ-6、Ⅰ-7），除传爆间隙差别外，其余参数设计均完全一致，试验结果却截然不同。低温环境试验中：当空气间隙距离为 20 mm 时（工况 Ⅰ-1），引信输出的能量击穿隔板后成功引爆主装药；但当空气间隙为 30 mm（工况 Ⅰ-5）或 40 mm（工况 Ⅰ-4）时，引信未能引爆主装药，仅将其击碎成四处飞散的药块。常温环境试验中：当空气间隙为 20 mm（工况 Ⅰ-2）和 25 mm（工况 Ⅰ-7）时，引信输出的能量击穿隔板后成功引爆主装药；而当空气间隙为 30 mm（工况 Ⅰ-6）时，引信未能引爆主装药，仅将其击碎成四处飞散的药块。

考虑到装药起爆主要是在冲击波作用下发生[29−32]，因此，引信与装药之间的传爆间隙对引战静态匹配性能影响较大。当传爆间隙超过某一临界值时，引信起爆、传爆能量将急速衰减，引信无法正常起爆主装药。若要系统研究传爆间隙极值，根据传统的控制变量法，需在 20～30 mm 之间继续设计试验，以进一步考查该试验条件下的传爆间隙阈值。

3.2.2　惰性缓冲层厚度

如表 1 所示，对比试验工况 Ⅲ-6 和 Ⅲ-7，2 发试验除缓冲层厚度存在差别外，其他设计参数（引信偏移 30 mm，隔板厚度 5 mm，传爆间隔 20 mm，温度−45 ℃）完全一致。当缓冲层厚度为 20 mm 时，引信起爆后均未能引爆主装药；缓冲层厚度减薄为 15 mm 时，主装药则完全爆轰，见证钢板上形成典型炸孔。因此，主装药尾端缓冲层厚度越厚，引信引爆主装药的成功率越低。对于本试验产品，在该工况条件下，能够引爆主装药的缓冲层厚度不宜超过 15 mm。

3.2.3　环境温度

对比试验工况 Ⅰ-3、Ⅰ-5 和 Ⅰ-6，3 发试验除环境温度不同外，其他参数完全一致。分析可知，该类型炸药在高温环境下能够成功起爆，但常温和低温环境下均未能稳定爆轰。因此，高温条件下主装药

更容易被引信引爆。对比工况 Ⅲ-1、Ⅳ-2 和 Ⅲ-6，发现高温和常温条件下均能成功引爆主装药，而低温环境下炸药仅出现燃烧，可见低温环境不利于产品形成稳定爆轰。从微观角度推测，低温环境下炸药产生体积收缩，易在自身内部形成微裂纹，影响爆轰波在炸药介质内部传播，从而导致不完全爆轰。

综合以上 6 组数据，可初步得出环境温度对该产品主装药的影响规律：温度越高（不超过 60 ℃）越易成功引爆，温度越低越不易形成稳定爆轰。

3.2.4　引信位置与隔板厚度

由于引信放置在隔板上，水平移动时其垂直高度不发生改变，不影响引信引爆的破片起爆弹体装药的可靠性；而引信偏心放置时，冲击波传播受到侧面稀疏波的影响，会产生汇聚、绕射等复杂现象，进而影响引爆炸药装药的冲击波能量。此外，隔板厚度也会对引信起爆的能量损耗产生影响。隔板越厚，引信击穿隔板时消耗的能量越多，易造成剩余的能量无法顺利引爆下方主装药。从工况 Ⅰ-1 的试验结果可以看出，当引信中心起爆、隔板厚度为 3 mm 时，主装药被成功引爆；但在工况 Ⅲ-6 中，将引信位置偏离中心轴线 30 mm，同时将隔板厚度增加至 5 mm 时，主装药未能完全爆轰，仅发生剧烈燃烧。

4　数据重构与分析

根据传统的试验设计相关方法，定义变量 x_i 对试验结果的影响值 V_i 为

$$V_i = y_{i\mathrm{a}}^{\max} - y_{i\mathrm{a}}^{\min} \tag{1}$$

式中：变量 x_i（i=1, 2, 3, 4, 5, …）的上限值和下限值分别为 $x_i^{\max}$、$x_i^{\min}$，其对应的试验结果分别为 $y_i^{\max}$ 和 $y_i^{\min}$，对所有 $y_i^{\max}$ 和 $y_i^{\min}$ 试验结果求取平均值，表示为 $y_{i\mathrm{a}}^{\max}$ 和 $y_{i\mathrm{a}}^{\min}$。

事实上，由于式 (1) 中影响值的定义方法只能在一定程度上表征单变量上、下限值对试验结果的影响趋势，无法评估变量在可行阈内取值大小以及变量间的耦合作用对试验结果的影响规律，因此，上述方法的参考意义十分有限。为克服上述不足，科学评价引战系统起爆传爆的可靠性，考虑到影响因素较多，本研究基于移动最小二乘法，构建多变量响应函数的高精度模型，对弹体装药可靠性数据进行场重构，从而对起爆可靠性问题进行全面定量分析。

4.1　移动最小二乘法原理

移动最小二乘法是 Lancaster 等[33] 通过按距离加权的方法计算近似函数值和给定数据值的差的平方和来度量拟合性能，它克服了传统最小二乘法对于复杂问题拟合精度不足的缺陷，特别强调加权函数的紧支撑性，具有局部数值分析的特点。定义在问题域 $\boldsymbol{\Omega}$ 中的一个局部子域上，假设需要拟合的函数 $y(x)$ 的近似函数 $\hat{y}(x)$ 可表达为

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^{m} p_i(x)a_i(x) = \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{a}(x) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{p}(x)$ 为基函数向量，可以选择不同的多项式基函数来控制拟合曲线/曲面的精度；m 为基函数个数；$a_i(x)$ 为基函数的系数，其值根据对函数 $y(x)$ 局部逼近的最小误差确定。

对于函数 $y(x)$ 的精确局部逼近，必须通过加权最小二乘法使局部逼近 $\hat{y}(x)$ 与函数 $y(x)$ 之间的差值达到最小。假设在计算点 x 的领域内有 n 个节点，近似函数 $\hat{y}(x)$ 在这些节点处误差的加权平方和可表示为

$$J = \sum_{I=1}^{n} w(x - x_I)\left[\sum_{i=1}^{m} p_i(x_I)a_i(x) - y(x_I)\right]^2 \tag{3}$$

式中：$y(x_I)$ 为给定的均匀分布的函数结合点；$w(x - x_I)$ 为一个具有紧凑支持的加权函数，并且 x_I 是点影响域中的离散点。权值施加在拟合值与给定值之间的平方误差上，通过调节节点的权重值达到拟合的最优化[34]。

权函数的选取在移动最小二乘法近似中具有重要作用，对计算结果影响很大，一般应满足非负性、紧支性、单调递减性和光滑性要求。

4.2　响应函数拟合分析

根据分析问题需要，选择拟合性能较好的高斯函数作为加权函数。考虑到试验数据有限，响应函数$\hat{y}(x)$的最高阶取为 2 阶。为更加精确地分析拟合结果，引入误差分析，其中决定系数S_{R^2}、相对平均绝对误差S_{RA}和均方根误差S_{RM}分别表示为

$$S_{R^2}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}|y_i-\bar{y}_i|^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{RA}}=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i-\bar{y}_i|}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{RM}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y}_i)^2} \tag{6}$$

式中：y_i、$\bar{y}_i$、$\bar{y}$分别为第 i 次试验结果、第 i 次试验对应的拟合模型预测结果和试验结果的平均值。

选取引信相对位置x_{1i}、隔板厚度x_{2i}、传爆间隙x_{3i}、惰性缓冲层厚度x_{4i}以及环境温度x_{5i}作为自变量，主装药被成功起爆对应的结果值y_i为目标响应函数。若主装药成功起爆，则试验结果记为 100；若主装药未成功起爆，则试验结果记为零。对表 1 的 22 发试验参数进行拟合，得到的拟合结果如图 8 所示。

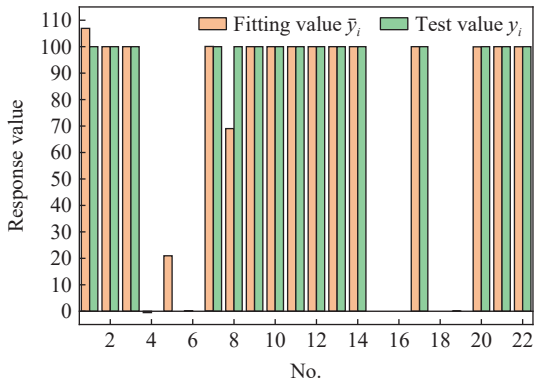


图 8　试验结果与重构值的对比

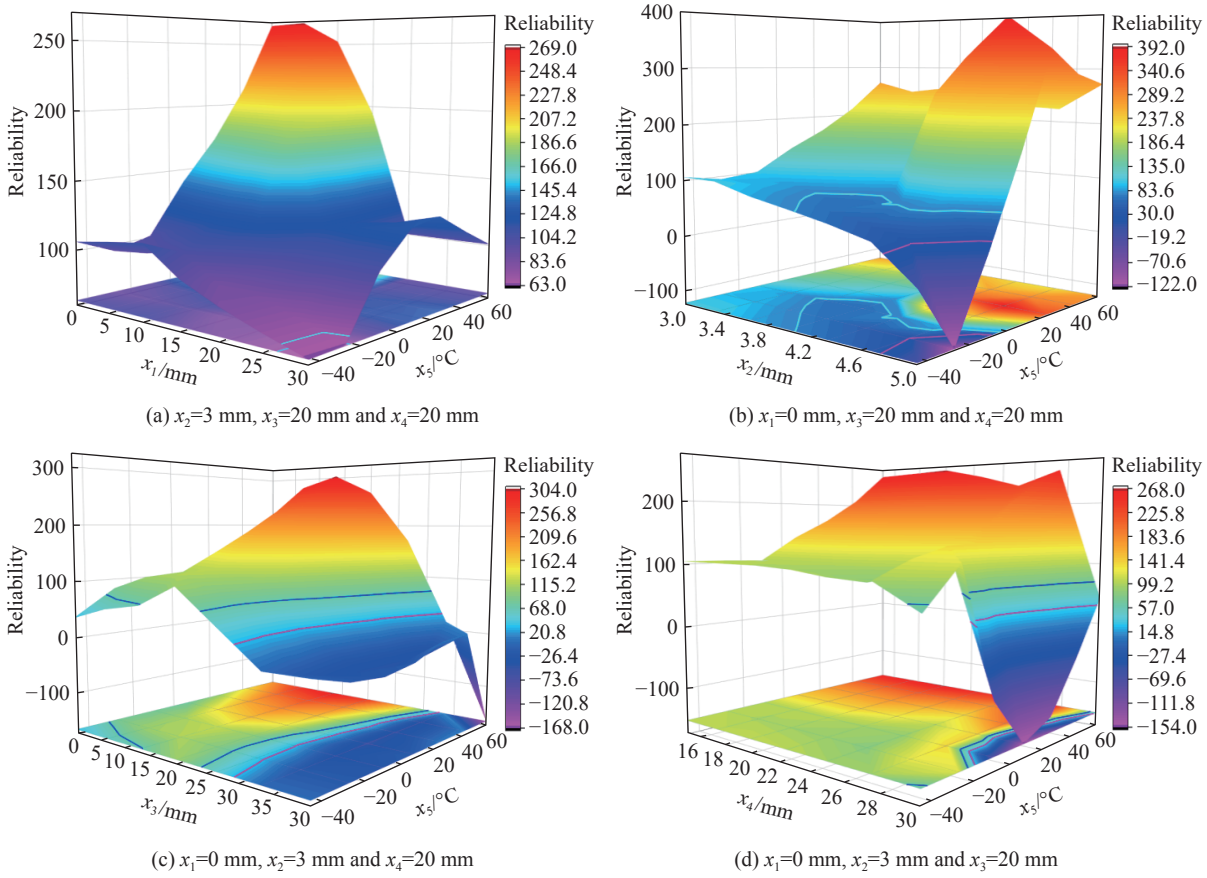
Fig. 8　Comparison of tested results and reconstructed values

通过对比分析可知，采用移动最小二乘法重构的试验结果与真实试验结果基本一致，当重构值低于 30 时，弹体主装药基本无法正常起爆；当重构值超过 70 时，弹体主装药基本能够正常起爆。通过对拟合结果误差分析可知，决定系数$S_{R^2}=0.969$，相对平均绝对误差$S_{\mathrm{RA}}=0.0583$，均方根误差$S_{\mathrm{RM}}=8.11$。综合分析拟合结果与试验结果的差值以及误差分析结果，可认为上述多变量响应函数可准确描述引信相对位置、隔板厚度以及传爆间隙等变量取值大小与主装药成功起爆结果之间的函数映射关系。

4.3　数据重构云图分析

利用上述响应函数，构建弹体装药可靠性起爆响应云图（即任意 2 个自变量与装药起爆结果之间的函数关系），同时系统地研究各敏感因素x_{ni}对结果的影响规律。基于动能侵彻弹的设计需求，引战匹配性能需在战斗部使用温度–45～60 ℃ 全域内满足要求，而引信相对位置（x_1）、隔板厚度（x_2）、传爆间隙（x_3）及惰性缓冲层厚度（x_4）可以通过设计进行调整，因而环境温度变量（x_5）与某一设计变量（x_1、x_2、x_3、x_4）耦合场的响应规律研究是十分重要的，数据重构结果如图 9 所示。

为降低战斗部在使用环境下不能正常作用的风险，提升引战系统可靠性，必须确保足够的传爆裕度，综合上述重构云图，设计引信的相对偏离位置不宜超过 25 mm，隔板厚度不宜超过 3.5 mm，传爆间隙不宜超过 25 mm，缓冲层厚度不宜超过 28 mm。此外，通过分析可知，引信相对位置在 0～30 mm 范围内时对温度不敏感；而隔板厚度、缓冲层厚度则分别对低温和高温敏感，传爆间隙在整个温度域内对温度的敏感程度基本相同。



(a) x_2=3 mm, x_3=20 mm and x_4=20 mm　　(b) x_1=0 mm, x_3=20 mm and x_4=20 mm

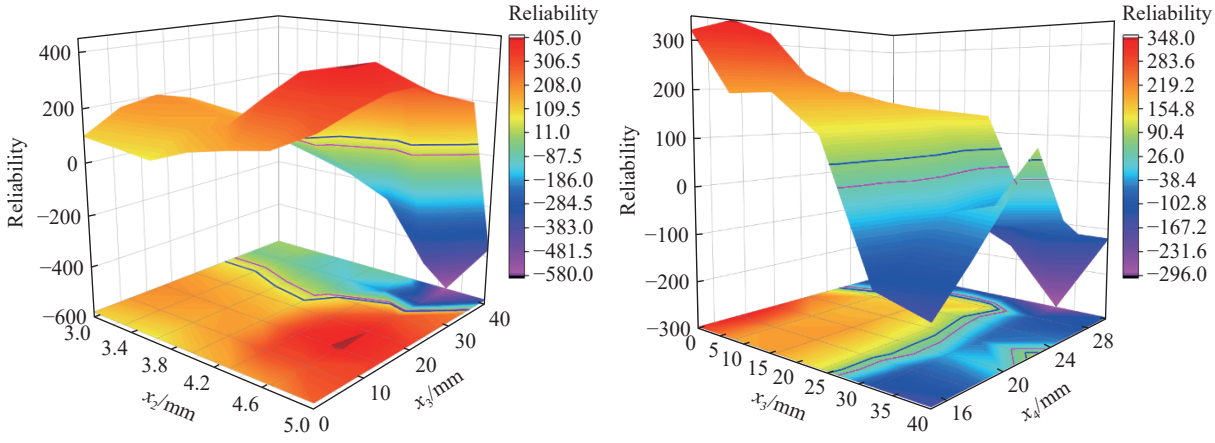
(c) x_1=0 mm, x_2=3 mm and x_4=20 mm　　(d) x_1=0 mm, x_2=3 mm and x_3=20 mm

图 9　环境温度对起爆可靠性的影响

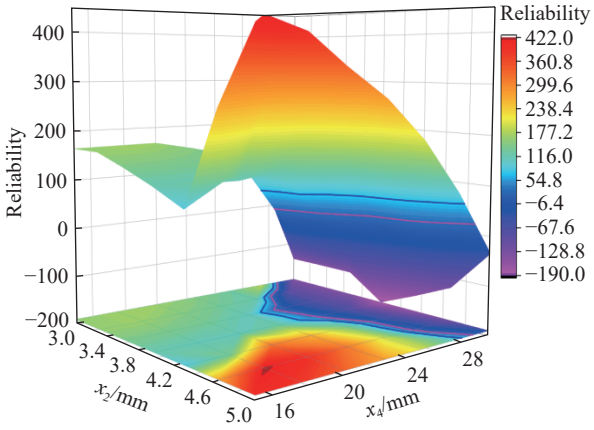
Fig. 9　Influence of temperature on detonation reliability

为进一步研究隔板厚度x_2、传爆间隙x_3和缓冲层厚度x_4设计对弹体装药起爆可靠性的影响，得到如图 10 所示的数据重构云图。

根据上述分析可知，在隔板厚度与传爆间隙的耦合作用下，传爆间隙对 3～5 mm 厚度隔板的变化不敏感，传爆间隙超过 25 mm 将直接影响弹体装药的起爆可靠性；在传爆间隙与缓冲层厚度的耦合作用下，弹体装药起爆对其均敏感，传爆间隙不宜超过 25 mm，缓冲层厚度不宜超过 28 mm，否则单一因素超过限值即可能影响弹体装药正常起爆；此外，在隔板厚度与缓冲层厚度的耦合作用下，缓冲层厚度对 3～5 mm 隔板厚度的变化敏感性不高，但一旦缓冲层厚度超过 22 mm，将直接影响弹体装药的起爆可靠性。



(a) x_1=0 mm, x_4=20 mm and x_5=22 °C　　(b) x_1=0 mm, x_2=3 mm and x_5=22 °C



(c) x_1=0 mm, x_3=20 mm and x_5=22 °C

图 10　弹体结构参数对起爆可靠性的影响

Fig. 10　Influence of structural parameters on detonation reliability

5　结　论

为充分考虑弹体结构设计等因素对弹体装药起爆可靠性的影响，设计了一套低成本、便携式引战静态匹配试验装置，开展了多种因素影响下的传爆裕度试验，并基于试验结果和移动最小二乘法，建立了多变量响应函数的高精度模型，系统研究了各敏感因素（引信相对位置、隔板厚度、传爆间隙、惰性缓冲层厚度及试验环境温度）以及各敏感因素之间的耦合作用对弹体装药起爆可靠性的影响规律，得到以下主要结论：

(1) 设计的便携式引战静态匹配试验装置不仅加工装配简单、成本低廉、可操作性强，而且可以充分考虑弹体结构设计中的相关因素对起爆可靠性的影响；

(2) 利用移动最小二乘法建立了多变量响应函数，该函数拟合结果与真实试验结果符合良好，因此，该方法能够定量分析各敏感因素及其耦合作用对起爆可靠性的影响；

(3) 传爆间隙和缓冲层厚度对弹体装药起爆影响较大，而隔板厚度在预设的 3～5 mm 范围内对弹体装药起爆的影响较小；

(4) 为保证起爆可靠性要求，侵彻弹设计时引信相对偏离位置应不超过 25 mm，隔板厚度不超过 3.5 mm，传爆间隙不超过 25 mm，缓冲层厚度不超过 22 mm。

以上内容是针对特定的装药类型、惰性缓冲层开展的研究工作，相关的试验方法、分析手段以及研究成果对动能侵彻弹结构设计及可靠性验证均有很好的借鉴价值和指导意义。

感谢中国兵器工业第 204 研究所和中国兵器工业第 212 研究所给予的指导和帮助。

参考文献：

[1] 高伟亮, 孙桂娟, 杨建超, 等. 国外钻地武器侵彻试验用弹等效模拟技术研究 [J]. 防护工程, 2022, 44(5): 21–25.
GAO W L, SUN G J, YANG J C, et al. Research on equivalent simulation technology of a foreign Earth-penetrating weapon trial projectile [J]. Protective Engineering, 2022, 44(5): 21–25.

[2] 党爱国, 李晓军. 国外钻地武器发展回顾及展望 [J]. 飞航导弹, 2014(6): 35–39.
DANG A G, LI X J. Review and prospect of the development of foreign Earth-penetrating weapons [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(6): 35–39.

[3] 黄亨建, 路中华, 刘晓波, 等. 欧美钝感弹药技术发展现状与趋势 [J]. 含能材料, 2017, 25(8): 618–621.
HUANG H J, LU Z H, LIU X B, et al. Present situation and development trend of insensitive munition technologies from Europe and America [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(8): 618–621.

[4] 杨舒棋, 张旭, 彭文杨, 等. 钝感炸药冲击起爆反应过程的 PDV 技术 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(2): 023402.
YANG S Q, ZHANG X, PENG W Y, et al. PDV technology of shock initiation reaction process of insensitive explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2): 023402.

[5] 文雯, 王淑娟, 代晓淦, 等. TATB 基 PBX 及其与 HNS 复合装药的高速破片撞击安全性 [J]. 含能材料, 2021, 29(5): 399–405.
WEN W, WANG S J, DAI X G, et al. High-speed impact safety properties the TATB-based plastic-bonded explosive and its HNS compound charge influence [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(5): 399–405.

[6] 黄璠. CL-20、TATB 基复合装药结构的 3D 打印成型及安全性研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
HUANG J. A kind of CL-20 and TATB-based composite charge structure by 3D printing technology and its safety study [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019.

[7] 张百磊, 常双君, 欧亚鹏. 浇注钝感 PBX 的研究进展及发展趋势 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(1): 42–45, 64.
ZHANG B L, CHANG S J, OU Y P. Research progress and development trend of casting desensitized PBX [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2015, 13(1): 42–45, 64.

[8] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究 [J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702–705.
LI Y Y, GAO L L, LI W, et al. Experiment research on security of insensitive explosive charge during penetration [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(6): 702–705.

[9] 马田, 李鹏飞, 周涛, 等. 钻地弹动能侵彻战斗部技术研究综述 [J]. 飞航导弹, 2018(4): 83–86, 92.
MA T, LI P F, ZHOU T, et al. A review on technology of Earth penetrator warhead [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(4): 83–86, 92.

[10] 常龙. 某弹的多功能引信传火及传爆序列结构优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
CHANG L. Optimization design of multifunctional fuze fire transmission and explosive transmission sequence structure of a projectile [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.

[11] 尚雅玲, 彭艳垒, 梁捷. 引信抗大过载技术研究及方案设计 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(6): 121–124.
SHANG Y L, PENG Y L, LIANG J. Research of fuze resisting high *g*-load technology and scheme design [J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(6): 121–124.

[12] 李晓峰, 王亚斌, 吴碧. 侵彻弹药引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 31–37.
LI X F, WANG Y B, WU B. Fuze of penetration ammunition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 31–37.

[13] 张波. 空面导弹系统设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 435–436.
ZHANG B. Air-to-surface missile system design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 435–436.

[14] 陈鹏, 屈可朋, 李亮亮, 等. PBX 炸药剪切流动点火性能的实验研究 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 69–73, 80.
CHEN P, QU K P, LI L L, et al. Experimental study on shear-flow ignition performance of PBX explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2020, 43(1): 69–73, 80.

[15] 崔银锋, 周伟江, 康乐. 引信传爆序列能量匹配性设计与试验 [J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(3): 337–344.
CUI Y F, ZHOU W J, KANG L. Design and test of energy matching for detonation train of fuze [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(3): 337–344.

[16] 肖向东, 肖有才, 蒋海燕, 等. 冲击波作用下引信传爆序列殉爆的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 054202.
XIAO X D, XIAO Y C, JIANG H Y, et al. Numerical simulation and analysis of fuze explosive trains under shock waves [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(5): 054202.

[17] 姚奎光, 王淑娟, 樊星, 等. 不同机械约束下压装 PBX 炸药反应演化行为 [J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1772–1778.
YAO K G, WANG S J, FAN X, et al. Reaction evolution behaviors of pressed plastic-bonded explosive (PBX) under different mechanical confinement conditions [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1772–1778.

[18] 白志玲, 段卓平, 李治, 等. 热刺激约束 DNAN 基不敏感熔铸炸药装药点火后反应演化调控模型 [J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1004–1012.
BAI Z L, DUAN Z P, LI Z, et al. Regulation model for reaction evolution of confined DNAN-based cast explosives after ignition under thermal stimulation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(10): 1004–1012.

[19] 楼建锋, 张树道. 不同点火方式下 HMX 基 PBX 炸药反应演化过程的特征分析 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(2): 022301.
LOU J F, ZHANG S D. Characteristic analysis of reaction evolution process of HMX-based PBX explosive under different ignition modes [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(2): 022301.

[20] 张世林, 黎殿来, 黄德雨. 某型深弹引信传爆序列设计与仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(3): 58–62.
ZHANG S L, LI D L, HUANG D Y. Design and simulation on explosive trains in fuze of a certain type of depth charge bombs [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(3): 58–62.

[21] 梁争峰, 石震, 徐茜萍, 等. 限制性模块化传爆装置可靠性试验 [J]. 火工品, 2012(1): 7–10.
LIANG Z F, SHI Z, XU Q P, et al. Reliability test of confined modular detonation transmission device [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(1): 7–10.

[22] 高金霞, 赵卫刚, 郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究 [J]. 火工品, 2008(4): 4–7.
GAO J X, ZHAO W G, ZHENG T. Study on the anti-overloading technique for penetrating warhead charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 4–7.

[23] 黄辉, 黄亨建, 王杰, 等. 安全弹药的发展思路与技术途径 [J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1079–1087.
HUANG H, HUANG H J, WANG J, et al. Development ideas and technical approaches for safety ammunition [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(10): 1079–1087.

[24] 彭文杨, 钟斌, 谷岩, 等. 金属隔层和空气间隙对钝感炸药冲击起爆的影响 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(3): 033402.
PENG W Y, ZHONG B, GU Y, et al. Effects of metal interlayer and air gap on the shock initiation of insensitive explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3): 033402.

[25] 徐恒威, 梁斌, 刘俊新, 等. 起爆偏心对聚能装药射流成型过程及威力参量的影响 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(1): 015102.
XU H W, LIANG B, LIU J X, et al. Effect of initiation eccentricity on shaped charge jet forming process and power parameters [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 015102.

[26] 董理赢. 引信传爆序列殉爆反应特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
DONG L Y. Study on the characteristics of the sympathetic detonation reaction in fuze explosive trains [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.

[27] 田秀琦. 不同环境温度下 JO-9C 传爆药冲击起爆特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
TIAN X Q. Study on shock initiation characteristics of JO-9C booster at different ambient temperatures [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.

[28] 金丽, 杨振英, 张玉若, 等. 一种直列式传爆序列的装药传爆性能试验研究 [J]. 含能材料, 2012, 20(1): 105–108.
JIN L, YANG Z Y, ZHANG Y R, et al. Performance of an in-line explosive trains [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(1): 105–108.

[29] 梁斌, 石啸海, 余春祥, 等. 装药驱动飞片引爆炸药性能影响参数分析 [J]. 应用数学和力学, 2019, 40(8): 893–909.
LIANG B, SHI X H, YU C X, et al. Analysis of effects on shock initiation performances for booster charge structure parameters [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019, 40(8): 893–909.

[30] 欧阳昌明, 段卓平, 孙宝平, 等. 冲击波和破片复合作用下装药起爆实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(Suppl 1): 63–66.
OUYANG C M, DUAN Z P, SUN B P, et al. Experimental study on initiation of charge under combined shock wave and fragment impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(Suppl 1): 63–66.

[31] COCHRAN K R, FAN L, DEVOE D L. Moving reflector type micro optical switch for high-power transfer in a MEMS-based safety and arming system [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(1): 138–146.

[32] 刘卫, 褚恩义, 刘兰, 等. 基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列技术研究进展 [J]. 含能材料, 2023, 31(6): 606–634.
LIU W, CHU E Y, LIU L, et al. Review on micro fire-train based on flyer impact initiation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(6): 606–634.

[33] LANCASTER P, SALKAUSKAS K. Surfaces generated by moving least squares methods [J]. Mathematics of Computation, 1981, 37(155): 141–158.

[34] QI W C, QIU Z P. A collocation interval analysis method for interval structural parameters and stochastic excitation [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(1): 66–77.

Tests and Sensitive Factors Analysis on Detonation Reliability of Charge for Kinetic Energy Penetrator Warhead

YANG Hui[1], WANG Kehui[1], WANG Weiguang[1], LI Yang[2],
SHEN Zikai[1], DUAN Jian[1], DAI Xianghui[1]

（1. *Northwest Institute of Nuclear Technology*, *Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*;
2. *Equipment Project Management Center of Rocket Equipment Department*, *Beijing* 100085, *China*）

Abstract: In order to investigate the influence of projectile structure design on the detonation reliability, a low-cost and portable static test device for fuze-warhead coordination is designed in this paper to carry out the tests of detonation transfer margin under different conditions. Based on the moving least square method, the multivariable response function is constructed to evaluate the detonation reliability and quantitatively analyze influence of the sensitive factors and coupled effects. The results indicate that the gap distance and the thickness of inert buffer layer have more significant impact on the detonation of the warhead charge while the influence of the interlayer thickness is relatively small within the preset range of 3–5 mm. To ensure the reliability of kinetic energy penetrators under ambient temperature, the relative position of fuze, the interlayer thickness, the gap distance and the thickness of inert buffer layer should not exceed 25, 3.5, 25, and 22 mm, respectively. The test device, analysis method and research results will provide a good reference and guideline for structural design and reliability verification of kinetic energy penetrators.

Keywords: kinetic energy penetrator; fuze-warhead coordination; detonation transfer margin; transmission detonation gap; inertial buffer layer; moving least square method